

Исследование напряженно-деформированного состояния материалов герметизированной сборочной конструкции СВЧ МДП-диодов

А.И.Поголов, А.М.Грушевский, Ю.Г.Долговых

Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)

Ю.В.Сурин, Т.В.Виговская, В.С.Бычкова

ФГУП «НИИМП-К» (г. Москва)

Проведены исследования напряженно-деформированного состояния материалов конструкции СВЧ МДП-диодов, выполненной в виде соединения кремниевой мембраны с двумя золотыми балочными выводами, при температурном воздействии и воздействии повышенного атмосферного давления. Конструкция защищена различными герметизирующими материалами на основе лаков, эмалей, компаундов. Разработаны рекомендации по минимизации напряженно-деформированного состояния соединения разнородных материалов путем физической совместимости материалов герметизированной сборочной конструкции диода.

Для решения задач повышения параметров СВЧ-трактов и снижения массогабаритных показателей в настоящее время в аппаратуре связи широко используют мембранные СВЧ МДП-диоды. В работе предлагается новая конструкция диода на основе кремниевой мембраны толщиной 7 мкм с комбинированным слоем диэлектрика толщиной 0,16 мкм и двумя балочными выводами толщиной 7 мкм. Жесткость слоев диэлектрика на несколько порядков меньше жесткости кремниевой мембраны и балочных выводов, поэтому использовалась упрощенная расчетная схема диода без учета слоев диэлектрика (рис.1). Ширина кремниевой мембраны и выводов 0,36 мм. Электрические параметры сформированных СВЧ МДП-диодных структур подвержены изменениям, связанным с воздействием внешней среды, поэтому существует необходимость защиты поверхности таких структур пленками различных герметизирующих материалов. Герметики защищают поверхность от воздействия таких внешних факторов, как механические воздействия, в частности попадание механических частиц на поверх-

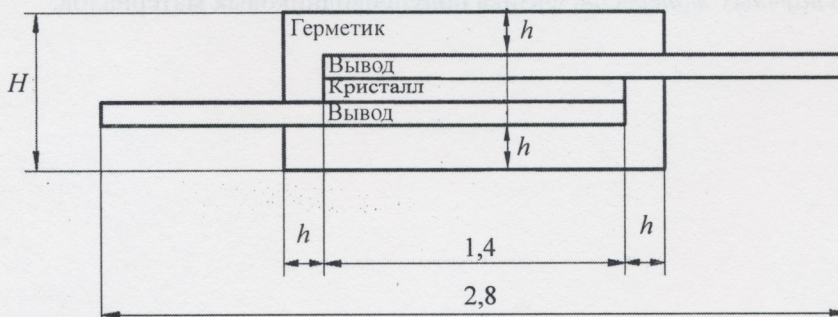


Рис. 1. Расчетная схема диода

ность прибора и механические повреждения, а также от влияния климатических факторов – давления, влажности и температуры окружающей среды. Толщина герметика h со всех сторон микросборки одинакова и равна 50–150 мкм, толщина диода H составляет 321 мкм.

В конструкции СВЧ МДП-диодов используются разнородные материалы, имеющие разные коэффициенты температурного линейного расширения (КТЛР) и модули упругости. При тепловых и силовых внешних воздействиях в конструкциях из разнородных материалов возникают механические деформации и напряжения. В тех случаях, когда механические напряжения достигают пределов прочности на растяжение или сжатие, материалы разрушаются. У большинства материалов сопротивление сжатия выше сопротивления растяжения, поэтому разрушение чаще всего происходит в области действия напряжений растяжения и начинается с образования трещины. При тепловых воздействиях трещина возникает в менее нагретых областях. Тепловые воздействия наиболее опасны для материалов, имеющих высокий ТКЛР, низкую теплопроводность, высокий модуль упругости, низкую прочность и пластичность. Элементы конструкций с резкими изменениями геометрии и формы являются концентраторами напряжений, которые затрудняют пластическую деформацию и являются зоной трещинообразования. Концентрация напряжений приводит к снижению прочности материалов, особенно при термоциклировании. Плавный переход от одной поверхности к другой уменьшает концентрацию напряжений.

Для герметизации применялись лак АД-9103 на полиимидной основе, эмаль ЭП-9114 на эпоксидной основе и кремнийорганический компаунд СИЭЛ. Эти материалы широко применяются в микроэлектронике и по своим физико-механическим свойствам охватывают наибольший диапазон изменения таких параметров, как модуль упругости E , коэффициент Пуассона μ , допускаемые напряжения $[\sigma]$, температурный коэффициент линейного расширения α . Физико-механические свойства материалов СВЧ МДП-диодов представлены в табл. 1 [1, 2].

Таблица 1

Физико-механические свойства материалов конструкции

Материал	E , МПа	μ	$\alpha \cdot 10^6$, °C ⁻¹	$[\sigma]$, МПа
Кремний	$1,3 \cdot 10^5$	0,3	4,2	200
Золото	$0,82 \cdot 10^5$	0,42	14,2	300
Лак АД-9103	3000	0,34	30	44
Эмаль ЭП-9114	6000	0,32	60	30
Компаунд СИЭЛ 159-191	3	0,4	180	8

Рассмотрим основные технологические и эксплуатационные свойства этих герметизирующих материалов. Компаунды СИЭЛ представляют собой композиции на основе низкомолекулярных кремнийорганических олигомеров с различными добавками. Компаунды СИЭЛ производят в виде одно- или двухкомпонентных составов, которые вулканизируются как в открытых, так и в закрытых объемах, при любой толщине слоя, без выделения побочных продуктов. Диапазон температур вулканизации компаундов широк – от комнатной и даже минусовых температур до 250 °С. Компаунды обладают хорошей адгезией к различным материалам электронной техники: металлам, золоту,

меди, алюминию, стеклу, керамике, пластмассам. Электроизоляционная эмаль марки ЭП-9114 с малым содержанием растворителя представляет собой двухкомпонентную систему, состоящую из полуфабрикатного лака (раствор эпоксидной смолы ЭД-20) и отвердителя аддукта ИМЭП-1. Предназначена для защиты печатных узлов, эксплуатируемых в интервале температур от -60 до $+125$ °С в любом климатическом районе, в том числе и в условиях тропического климата. Модуль упругости лака высокий, адгезия хорошая. Полиимидный лак – это раствор полиамидокислоты в полярном растворителе. Лаки и эмали на полиимидной основе являются теплостойкими среднечастотными диэлектриками. Лак, в частности марки АД-9103, наносят обычными методами или электростатическим напылением на любые материалы, выдерживающие нагрев до температуры не ниже 300 °С (температура сушки покрытия 300 – 400 °С). Полиимидные покрытия могут выдерживать температуру 260 – 290 °С в течение нескольких недель, сохраняя при этом свои защитные свойства. По твердости и износостойкости они значительно превосходят другие покрытия на основе органических составляющих и приближаются по указанному свойству к фарфору. Электроизоляция на основе полиимидного лака имеет высокую теплопроводность, химическую и эрозионную стойкость.

Задачи исследования напряженно-деформированного состояния соединения разнородных материалов из-за своей сложности требуют применения численных методов, основанных на дискретной обработке расчетной области с использованием метода конечных элементов (МКЭ) [3–5]. К преимуществам МКЭ относится возможность работы с объектами произвольной геометрии и формы из разнородных материалов. Суть метода заключается в разработке аналитической модели исследуемого объекта путем исключения несущественных деталей, редукции размерностей, разбиения объекта на конечные элементы (КЭ), подготовки данных для анализа и поиска наилучшего решения. Точность решения зависит от правильного выбора геометрии, построения сетки конечных элементов (количество КЭ, их форма и размеры), задания граничных условий и внешних воздействий, достоверности свойств материалов. Использовались КЭ в виде правильных многоугольников (куб, тетраэдр) с соотношением сторон не более $1:4$ и углами 30 – 150 °. Для оценки погрешности в зависимости от размеров КЭ выполнялось несколько расчетов при различных разбиениях объекта и строилась зависимость исследуемых параметров от размера КЭ, проводилась экстраполяция на случай размера КЭ, стремящегося к нулю. Минимальный линейный размер конечного элемента составлял 2 мкм, исследуемые модели содержали до $4 \cdot 10^5$ узлов.

Алгоритм метода расчета включает в себя модуль исходных физико-механических свойств используемых материалов. К основным свойствам материалов относятся: прочность – способность противостоять нагрузкам без разрушения; жесткость – способность противостоять изменению формы и размеров без разрушения; упругость – способность восстанавливать первоначальные размеры и форму после снятия нагрузок; пластичность – способность получать остаточную пластическую деформацию после снятия нагрузки; выносливость – способность противостоять действию переменных циклических напряжений без возникновения и развития трещины. Выбор материалов конструкции СВЧ МДП-диодов должен быть обоснован прежде всего по механической прочности, модулю упругости и КТЛР.

Анализ обеспечения прочности проводился в два этапа. На первом этапе определялись максимальные эквивалентные напряжения в материалах сборки по теории энергии изменения формы [6]. Затем максимальные эквивалентные напряжения сравнивали с допустимыми для данного материала и получали ответ на вопрос: является ли конструкция прочной. При моделировании использовались следующие принципы и допущения:

- деформации в материалах линейно-упругие, граничные условия не изменяются в процессе нагружения;
- материал сплошной, однородный, изотропный;
- зависимость между деформациями и напряжениями линейная;
- усилия, напряжения, деформации, вызванные различными внешними факторами, действуют независимо и соблюдается принцип суперпозиции;
- напряжения, вызванные различными факторами (внутренние начальные напряжения, температурные, от внешних силовых факторов и др.), суммируются с учетом знака.

Целью данного исследования является изучение закономерностей влияния конструктивно-технологических и эксплуатационных факторов на прочностную надежность материалов изделия. Исследовалось влияние марки герметика (использовался лак АД-9103, эмаль ЭП-9114, компаунд СИЭЛ); толщины герметика (50, 100, 150 мкм); теплового нагрева материалов изделия на 40 °С; воздействия повышенного атмосферного давления воздуха до $2 \cdot 10^5$ Па. Было разработано пять конечно-элементных моделей. Результаты представлены в табл.2 и 3. Конечно-элементная модель диода показана на рис.2. Для повышения точности и эффективности моделирования использовались свойства симметрии геометрии и граничных условий конструкций – рассматривалась половина полной модели.

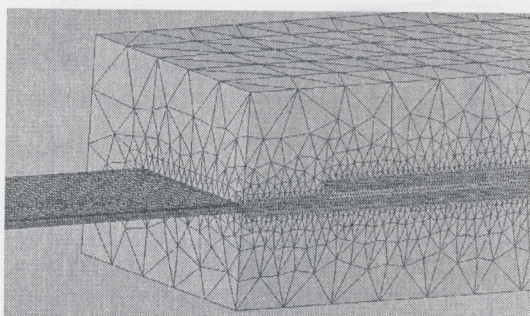


Рис.2. Конечно-элементная модель диода

Таблица 2

Эквивалентные напряжения (в МПа) в материалах базовой модели

Материал	Сечение по толщине сборки		
	на оси симметрии	около угла кристалла	на выходе вывода из герметика
Кремний	77,3	85,5	-
Золото	39,8	66,4	18,6
Лак АД-9103	3,2	5,6	10,8

Таблица 3

Эквивалентные напряжения (в МПа) в материалах конструкции

Номер модели	Параметры	Материал		
		кремний	золото	герметик
№ 1 (базовая)	Герметик АД-9103, $h = 0,1$ мм	85,5	66,4	10,8
№ 2	Герметик АД-9103, $h = 0,15$ мм	73,6	88	6,8
№ 3	Герметик АД-9103, $h = 0,05$ мм	55	59	6,5
№ 4	Герметик ЭП-9114, $h = 0,1$ мм	175	209	34
№ 5	Герметик СИЭЛ 159-191, $h = 0,1$ мм	51	34	2,4

Основной эффект воздействия повышенного давления заключается в сжатии, деформации материалов, изменении внешнего вида изделия. Типичный вид отказов при этом – механическое повреждение. Приведем значения максимальных эквивалентных напряжений в материалах сборки диода при повышенном атмосферном давлении:

Материал сборки	σ_{\max} , МПа
Лак АД, $h = 0,1$ мм (модель № 1)	1,2
Лак АД, $h = 0,15$ мм (модель № 2)	1,56
Лак АД, $h = 0,05$ мм (модель № 3)	0,79
Эмаль ЭП, $h = 0,1$ мм (модель № 4)	0,91
СИЭЛ, $h = 0,1$ мм (модель № 5)	2,22

Наибольшие напряжения возникают в кремнии и золоте около угла кристалла. При увеличении толщины лака АД-9103 до 0,15 мм (модель № 2) максимальные напряжения увеличились в 1,3 раза и составили 1,56 МПа. При уменьшении толщины лака до 0,05 мм максимальные напряжения уменьшились в 1,52 раза и составили 0,79 МПа. Видно, что более жесткий герметик – эмаль ЭП-9114 эффективно разгружает материалы соединения золото – кремний при действии повышенного атмосферного давления.

На рис.3 представлено напряженно-деформированное состояние диода при тепловом нагреве на 40 °С при использовании трех марок герметика: лака АД-9103

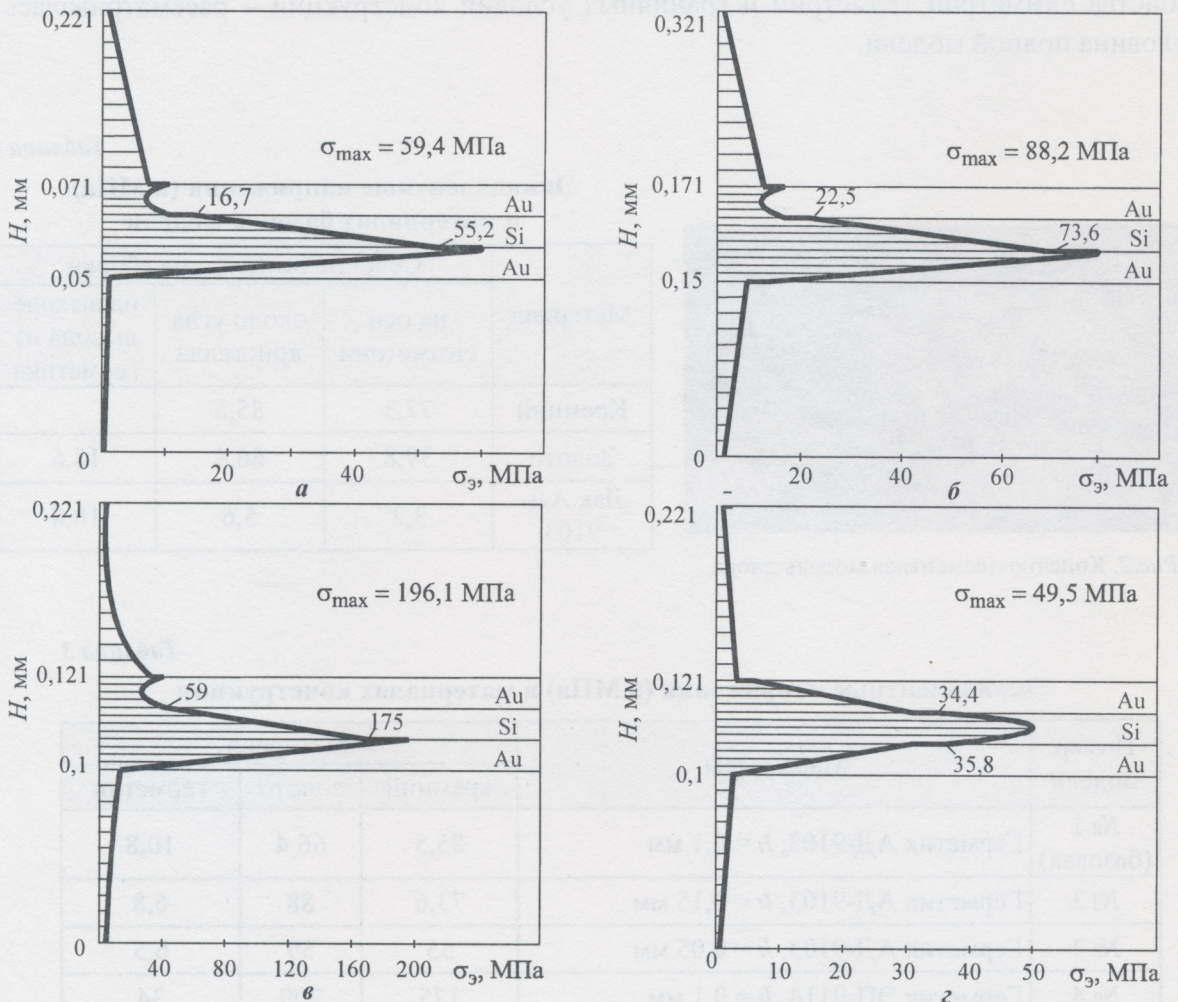


Рис.3. Эпюра распределения эквивалентных температурных напряжений по высоте сборки диода около угла кристалла при использовании следующих герметиков: а – лак АД-9103, $h = 0,05$ мм; б – лак АД-9103, $h = 0,15$ мм; в – эмаль ЭП-9114, $h = 0,1$ мм; г – компаунд СИЭЛ 159-191, $h = 0,1$ мм. Цифры на эпюрах – действующие значения напряжений (в МПа) в кремнии на границах раздела материалов

(рис.3,а,б, модель № 1); эмали ЭП-9114 (рис.3,в, модель № 4); компаунда СИЭЛ (рис.3,г, модель № 5). Использование для герметизации диода жесткой эмали ЭП-9114 ($E = 6000$ МПа, $\alpha = 60 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) обусловило высокие значения напряжения в материалах соединения золото–кремний $\sigma_{\max} = 209$ МПа. Использование лака АД-9103, имеющего более низкий модуль упругости ($E = 3000$ МПа) и КТЛР ($\alpha = 30 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$), обусловило снижение максимальных напряжений в 2,44 раза – до 85,5 МПа. Применение податливого компаунда СИЭЛ с низким модулем упругости $E = 3$ МПа даже при плохой совместимости с золотом и кремнием по КТЛР ($\alpha = 180 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) привело к снижению максимальных напряжений до 51 МПа (см. табл.3).

В табл.2 приведены значения максимальных эквивалентных напряжений в материалах базовой модели. Видно, что в кристалле кремния наблюдается существенное повышение напряжений в кремнии с 77,3 на оси симметрии до 85,5 МПа около угла (коэффициент концентрации напряжений $k = 1,11$), в золотом выводе с 39,8 до 66,4 МПа ($k = 1,67$). В герметике (лак АД-9103) максимальные напряжения 10,8 МПа наблюдаются в месте выхода вывода из герметика ($k = 3,4$).

На эпюрах эквивалентных напряжений по высоте сборки около угла кристалла (см. рис.3,а,б) видно влияние толщины герметика на величину напряжений. Повышение толщины герметика с 0,05 до 0,15 мм приводит к повышению напряжений в золотом выводе в 1,5 раза.

Распределение максимальных эквивалентных температурных напряжений в золотом выводе по его длине для базовой модели № 1 показано на рис.4. Максимальные напряжения 66 МПа возникают около угла кристалла кремния на выходе вывода из герметика. Через 0,1 мм напряжения уменьшаются в 3,5 раза и составляют 18,6 МПа.

Проведенные исследования подтвердили существенное влияние конструктивно-технологических и эксплуатационных факторов на прочностную надежность материалов СВЧ МДП-диодов. При тепловых внешних воздействиях материалы конструкции диода должны быть совместимы по механической прочности, модулю упругости и температурным коэффициентам линейного расширения. При использовании эмали ЭП-9114 в кремнии и золотом выводе возникают напряжения, близкие к предельно допустимым – 175 и 209 МПа соответственно. Использование лака АД-9103 снижает напряжения в 2–3 раза, использование герметика СИЭЛ – в 3–6 раз. При увеличении толщины герметика с 0,05 до 0,15 мм напряжения в золотом выводе повышаются с 59,4 до 88,2 МПа (в 1,48 раза). При действии повышенного атмосферного давления для защиты целесообразно использовать жесткие герметики – эмаль ЭП-9114 или лак АД-9103, которые позволяют уменьшить напряжения в материалах соединения золото–кремний в 2–3 раза. Разработка и производство СВЧ МДП-диодов с улучшенными характеристиками позволят создать современную электронную компонентную базу, востребованную на рынке продуктов гражданского и военного назначения.

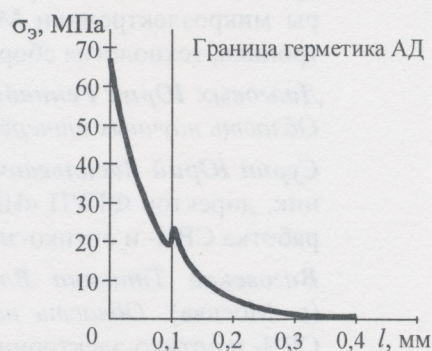


Рис.4. Распределение максимальных эквивалентных температурных напряжений по длине вывода при использовании герметика АД-9103

Литература

1. Физические величины: Справочник / Под ред. И.С.Григорьева, Е.З.Мейлахова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
2. Кузнецов О.А., Поголов А.И., Сергеев В.С. Прочность элементов микроэлектронной аппаратуры. – М.: Радио и связь, 1990. – 144 с.
3. Ли К. Основы САПР (CAD/CAM /CAE). – СПб.: Питер, 2004. – 560 с.
4. Норенков И.П., Кузьмик П.К. Информационная поддержка наукоемких изделий. CALS-технологии. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 320 с.
5. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 448 с.
6. Феодосьев В.И. Соппротивление материалов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 592 с.

Статья поступила
после доработки
5 мая 2008 г.

Поголов Анатолий Иванович – профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой технической механики МИЭТ. *Область научных интересов:* механика материалов и конструкций микроприборов.

Грушевский Александр Михайлович – доктор технических наук, профессор кафедры микроэлектроники МИЭТ. *Область научных интересов:* твердотельная электроника, технология сборки и монтажа микросистем.

Долговых Юрий Геннадьевич – аспирант кафедры технической механики МИЭТ. *Область научных интересов:* проектирование и технология электронных средств.

Сурин Юрий Васильевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, директор ФГУП «НИИМП-К» (г. Москва). *Область научных интересов:* разработка СВЧ- и оптико-электронных технологий, приборов, модулей и устройств.

Виговская Татьяна Владимировна – главный технолог ФГУП «НИИМП-К» (г. Москва). *Область научных интересов:* разработка технологий изготовления СВЧ- и оптико-электронных приборов и интегральных схем.

Бычкова Валентина Сергеевна – аспирант ГУП НПЦ «СПУРТ» (г. Москва). *Область научных интересов:* разработка технологий СВЧ-приборов на основе полупроводниковых и диэлектрических мембран.

Важная информация

В редакции журнала «Известия вузов. Электроника»
изменились номера телефона и факса.

Тел.: 8-499-734-62-05

Факс: 8-499-710-54-29